

Ich, Clausius, die Entropie und die Ökonomen¹

Im Auftrage des Binswangerschen Festkomitees herausgegeben und
mit gelehrten Anmerkungen versehen von Prof. Ulrich Müller-Herold,
Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.

Ich heiße Rudolf Clausius und habe die Entropie erfunden. Mein Ruhm erreicht den Himmel.² Denn mein Gesetz, das Gesetz der Entropie, verheißt der Welt und den Sternen ein Ende. Daß die Energie unzerstörbar ist, rettet das Universum nicht vor dem Wärmetod. Ich habe dem Universum mein "memento mori" entgegen gerufen.

Wer ich bin? Ich bin ein Preuße, aus Köslin in Pommern, und Professor der Physik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.³ Genauer: ich war es, denn nun bin ich schon seit einiger Zeit jenseits dieser Gefilde. Und wenn ich sage: seit einiger Zeit, so ist das eine sehr irdische Ausdrucksweise, denn hier in der Ewigkeit gibt es ja die Zeit gar nicht; Ewigkeit ist ein Bereich ohne Zeit, übrigens genau wie meine Thermodynamik, in der die Zeit ja auch nicht vorkommt. Darin ist sie einzigartig, die Thermodynamik, unter den großen Theorien der Physik, daß die Zeit nicht vorkommt. Insofern ist mir die Ewigkeit nicht völlig fremd, von meiner einstigen Arbeit her. Aber so richtig, zugegebenermaßen, verstehe ich das noch immer nicht. Im Gegensatz zur Unendlichkeit! Da habe ich durchaus Klarheit, aber "Ewigkeit" ist mir noch immer ein Stück zu hoch.

Denn wie soll man, bitte schön, verstehen, daß das mit Himmel und Hölle ja überhaupt nicht - oder zumindest: nicht mehr - so ist wie früher. Das 20. Jahrhundert mit seinem Gerede von Ganzheitlichkeit, von der Vereinigung der Gegensätze, der *coniunctio oppositorum*, hat einiges hier in Bewegung gebracht: Himmel und Hölle, die gibt es einfach so nicht mehr. Jetzt gibt es nurmehr das "integrierte Gesamt-Jenseits"⁴. Der Dante macht ganz schöne Augen, dem hat man gewissermaßen den Teppich unter den Füßen weggezogen. Es ist halt ein schwerer Brocken, daß die Ewigkeit, die doch zeitlos ist, sich derart verändert im Laufe der Äone. Als Wissenschaftler vermute ich, daß es möglicherweise zwei Arten von Zeit gibt, eine jenseits-interne, die für uns Jenseitige stillsteht aufgrund der Ewigkeit, und eine jenseits-externe für Wesen von anderswo, so ähnlich vielleicht wie am Rande dieser schwarzen Löcher, die es neuerdings im Kosmos geben soll.⁵

Hier übrigens ist es fast unmöglich, über so etwas vernünftig zu reden. Was weiter nicht erstaunt. Denn sobald man allwissend ist, ist Wissenschaft nicht mehr interessant. Mit Ausnahme allerdings von meiner Wissenschaft, der Thermodynamik. Von der ist hier häufig die Rede. Aber eben nicht aus wissenschaftlichen Gründen, sondern aus einer Art, nun sagen wir, religionspolitischer Dankbarkeit. Als ich mit meiner Entropie kam, im späten 19. Jahrhundert, hatte es die Kirche - und hier meine ich auch als Preuße natürlich die römische Kirche - also damals hatte die Kirche einen schweren Stand: Kant hatte mit seiner Destruktion der Gottesbeweise einer scholastischen Kernposition den Gnadenstoß gegeben, Darwin mit seiner Lehre der Abstammung aus dem Tierreich dem Menschen die Krone der Schöpfung entrissen und der französische Mathematiker Laplace von Gott gesagt, diese Hypothese brauche er nicht.⁶ Man hatte den Kirchenstaat zerschlagen, den Nachfolger Petri zum Oberhaupt eines Staates von der Größe Monacos demontiert, einen Kulturkampf eröffnet, um Rom auch nördlich der Alpen zu entmachten, und die Physik - unter dem Einfluß der klassischen Mechanik - insinuierte, ein Ende, ein jüngstes Gericht, sei gegen die Gesetze der Wissenschaft, die Welt sei ewig. Aus allen Richtungen schlugen die Brecher über das Schiff Petri. Es war die Stunde des Antichrist.

Alle hier wissen, wie dann doch das Blatt sich wendete, wie zunächst und überraschend es sich erwies, daß Petrus und seine Nachfolger in bestimmten Fragen ja gar nicht irren können, also gewissermaßen unfehlbar sind.⁷ Aber auch ich habe - unbeabsichtigt, aber kaum ohne höhere Fügung - ein klein wenig zur Wende beigetragen: Mein Satz: "Die Energie der Welt ist konstant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu"⁸ eröffnet der Welt ihr sicheres Ende. Vom römischen Standpunkt gesehen war es wissenschaftliche Nothilfe in Zeiten schwerster Prüfung. Hier endlich trat jemand der klassischen Mechanik und damit der Physik entgegen, hier eröffnete jemand den Gläubigen Wege, den Anmaßungen der wissenschaftlichen Vernunft auf deren eigenem Terrain entgegenzutreten. Und wenn auch der Zusammenhang zwischen dem Wärmetod der Welt und dem neutestamentarischen Ende der Zeiten niemals wirklich klar gestellt wurde, so war schließlich die Frage nach einem Ende der Zeit wissenschaftlich wieder soweit offen, daß man als Gläubiger wieder frei atmen und ohne schwerste Seelenpein auch selbst wieder Physiker werden konnte.⁹

Das hat man mir nicht vergessen hier. Natürlich, ich bin nicht mit meinem Leben für diese Dinge eingestanden, habe nicht Credo in den Sand geschrieben und Zeugnis abgelegt. Meine Beitrag war indirekter: Ich habe nicht den Glauben verteidigt, sondern nur seine Gegner attackiert. Für das *Heilige Officium* war ich

einfach der Gegner seiner Gegner. Auch als Getaufter der Reformationskirchen war ich damit salviert, wenn ich auch - wegen meiner späteren Arbeit über die mechanische Theorie der Wärme - ein gutes Weilchen in der Purgatoriums-Ecke zugebracht habe, bevor ich dann in lichtere Gefilde des Jenseits gelangte.¹⁰

Von dieser Episode des 19. Jahrhunderts ist etwas geblieben über die Wissenschaft hinaus: theologisch Interessierte jeder Couleur verbinden mit der Entropie etwas besonderes, auch oder gerade solche Menschen, die ansonsten mit Thermodynamik nur wenig anzufangen wissen. Waren es zunächst vor allem evangelische Pfarrer¹¹ und Katholiken des Kepler-Bundes¹², so ist es heute die Glaubensgemeinschaft der Ökonomen, die ein Gelehrter namens Binswanger dingfest gemacht hat.¹³ Dieser Binswanger - ich denke, es war in St. Gallen, erkenne das aber von hier nicht so genau - argumentiert, daß mit dem wirtschaftlichen Tun ein Glaube an den Sinn dieses Tuns verbunden ist, aber auch eine Furcht vor dem Verlust dieses Sinnes, wenn das Tun ins Leere geht. Die wissenschaftlichen Ökonomen sind die Quasi-Theologen dieser Religion. Wie Epiktet, Adam Smith und andere Stoiker glauben sie an "unsichtbare" Hände. Und nach den christlichen haben halt jetzt auch diese stoischen Ökonomie-Theologen die Entropie für sich entdeckt und für die Umwelt eingespannt.

Was ich davon halte? Nun ja, das ist keine einfache Geschichte, denn die Entropie ist ja von vielen nicht verstanden worden, die sie für ihre Zwecke eingesetzt haben. Zum Beispiel von den Informationstheoretikern. Noch deutlich in Erinnerung ist mir die flapsige Bemerkung Johann von Neumanns¹⁴ zu Claude Shannon¹⁵: "It (entropy) is already in use under that name and besides it will give you a great edge in debates because nobody really knows what entropy is anyway."¹⁶ Aber man muß doch einräumen, daß die Informationstheoretiker wenigstens mit der Entropie etwas Nützliches anstellen. Es ist nämlich einfach, mit Entropien zu rechnen, auch wenn es schwer ist, sie zu verstehen. Ingenieuren, die Verbrennungsmotoren bauen, oder den chemischen Thermodynamikern muß ich das nicht eigens sagen: sie leben davon.

Längst gebe ich nichts mehr auf die Frage, ob einer "recht hat" mit seinen Vorstellungen zur Entropie. Statt dessen sehe ich erst einmal, was jemand mit der Entropie denn so anstellt. An ihren Früchten sollt ihr sie erkennen, heißt ja eine bekannte, durchaus nicht nur hier im Jenseits propagierte Maxime. Und da kommt sofort die erste Wegscheide: Verwendet jemand die formalen Eigenschaften der Entropie und rechnet etwas nützliches aus, das man auf anderem Wege entweder gar nicht oder nur umständlich erhalten könnte - oder ist die Entropie nur eine

Metapher für irgend etwas anderes? Und wenn es halt nur eine Metapher ist: weist wenigstens die einen Weg, den man nicht fände ohne gerade sie?

Zum Beispiel Georgescu-Roegen:¹⁷ Für den ist die Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik eine Metapher für die Einbahnstraße zwischen Rohstoffen und Abfällen, für die Verschleuderung naturgeschichtlichen Erbgutes, für unvermeidlichen Niedergang. Dem gab er den Namen "entropic flow". Nun ja. Ob er damit etwas auslöst, das ohne die Entropie-Metapher nicht zu haben wäre: ich weiß es nicht! Vielleicht.

Wenn es nun dabei bliebe, so wäre ja alles noch gut. Haltet ein, an dieser Stelle, ihr Ökonomen, möchte man rufen, für die Predigt reicht es, und alles andere ist von Übel.¹⁸ In Goethes Worten:

*Und deines Geistes höchster Feuerflug
hat schon am Gleichnis, hat am Bild genug!*

Aber die Volkswirtschaft ist ja eine mathematische Wissenschaft geworden, die will es nun genauer wissen und fängt an, die Entropie-Metapher auch formal ernst zu nehmen. Und weil Professoren der Volkswirtschaftslehre nicht selten ehemalige Naturwissenschaftler sind, die sich voll Wehmut an die Thermodynamikkurse ihrer Jugend erinnern, ist der Spaß vorbei. Unter uns gesagt: Wenn ich die Beiträge in *Ecological Economics* lese, komme ich aus dem Staunen nicht mehr heraus. Die Hauptsätze der Thermodynamik werden in der Regel zutreffend zitiert, aber in der konkreten Argumentation geht es dann schnell einmal schief. Der von Georgescu-Roegen etwa postulierte sogenannte 4. Hauptsatz der Thermodynamik etwa ist toller als ein Kapitel aus der Apokalypse des Johannes.¹⁹

Auf der Erdoberfläche - und um die geht es ja in der Umweltökonomie - unter isotherm-isobaren Verhältnissen strebt ein System in Gottes Namen nach einem Zustand minimaler freier Enthalpie.²⁰ Das ist die einzige thermodynamische Größe mit einem klaren Trend. Punktum. Sonst nichts. Die Entropie hingegen hat unter diesen Bedingungen keinen klaren Trend. Friert im Winter der Bodensee zu oder der Zürisee - dann sinkt seine Entropie. Ein Drittsemestriger kann das ausrechnen. Keine Rede von einer Zunahme. Wer hat denn da nicht aufgepaßt?

Und dann diese Streitigkeiten um den Boltzmanschen H-Satz und den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, den Ergodensatz und andere Ladenhüter aus der Frühzeit.²¹ Hat die Umweltökonomie keine anderen Sorgen? Ich habe mir sagen

lassen, daß das halt so die Art sei, wie die Umweltökonomie ihre Fehden mit der Neoklassik austrägt. Mag sein. Aber wissenschaftlich ist es völlig abgeschmackt. Die Formen der Entropie, von denen bei Boltzmann und bei mir die Rede ist, sind für die Umwelt ohne Bedeutung. Nimmt man Georgescu-Roegen, Daly oder auch Ayres ernst, in dem was sie vielleicht meinen, so sprechen sie ausschließlich von der sogenannten Mischungsentropie. Das ist jene Zunahme der Entropie, die sich beispielsweise ergibt, wenn man zwei reinen Gasen erlaubt, sich zu mischen. Die Mischungsentropie ist ein Konzept der chemischen Thermodynamik. Sie hat mit dem Boltzmannschen H-Satz nicht das geringste zu tun.²² (Die chemische Thermodynamik ist kein Teil der Carnot-Kelvin-Clausius'schen Thermodynamik, sie ist eine Erweiterung derselben, kompatibel mit ihr, aber nicht identisch.)

Und die Mischungsentropie, wie steht es um die? Nun ja, hochwertige Erze haben eine vergleichsweise geringe, Abfallprodukte oft eine höhere Mischungsentropie. Aber nicht immer. Die Schwermetalle in den Filterstäuben von Kehrichtverbrennungsanlagen können höher konzentriert sein als in natürlichen Erzen. Im Falle etwa von Zink. Siedlungsabfälle sind eine ergiebige Quelle für die Kupfergewinnung. Nur der tiefe Kupferpreis verhindert, daß man derzeit auf diese Weise Kupfer gewinnt. Der Eisenanteil im Schrott, einer leicht abtrennbaren Abfallfraktion, ist höher als in natürlichen Erzen. Eisen ist aus Schrott energetisch wesentlich günstiger zu gewinnen als aus Eisenerz. In all diesen Fällen ist mithin die Mischungsentropie der Abfälle geringer als die der Rohstoffe.²³

Betrachtet man andererseits die energetischen Kosten der Goldproduktion aus natürlichen Erzen, dann sieht man, daß die Verminderung der Mischungsentropie auf dem Wege vom Erz bis zum geläuterten Gold energetisch überhaupt nicht ins Gewicht fällt, verglichen mit dem technischen Energieaufwand der Goldgewinnung, angefangen von dem gewaltigen Aufwand für das Anlegen der Bergwerke, das Brechen und Zermahlen des Gesteins bis hin zu den aufwendigen Prozeduren um das im Gold gelöste Kupfer und Silber davon zu scheiden. Was ist da schon der entropische Anteil? Eine Träne im Ozean!

An diesem ganzen Gerede von der unausweichlichen Zunahme der Entropie sobald nicht etwas ganz besonderes ihr entgegen wirkt, ist in hohem Maße mein Kollege, der Quantenphysiker Erwin Schrödinger schuld. In seinem ebenso folgenreichen wie unsorgfältigen Buch "Was ist Leben?" hat er 1944 ausführlich über die alles zersetzende Rolle der Entropie geredet und darüber, wie angeblich das Leben dem entropischen Prinzip entgegenwirkt.²⁴ Schrödinger ist diese Schlamperei nicht vergeben worden hier oben, denn schließlich hat er fast

gleichzeitig ein Buch über statistische Thermodynamik geschrieben, war also fachlich mit Sicherheit auf dem Laufenden.²⁵ Die verschämte Fußnote in den späteren Ausgaben von "Was ist Leben?", daß man richtigerweise nicht von der Entropie sondern von der freien Enthalpie sprechen müßte, zeigt, daß er durchaus wußte, was er tat.²⁶ Über die Rolle der Entropie hat er das Publikum wider besseres Wissen in die Irre geführt.

Wenn ich als vom irdischen Wissenschaftsbetrieb "lösgelöster Beobachter" mir aus all dem meinen Reim mache, so neige ich zu folgendem: Rohstoffe nicht zu vergeuden ist eine richtige und wichtige Forderung. Um die zu begründen aber braucht man die Entropie nicht zu bemühen. Führt man Entropiekonzepte aber gleichwohl ins Feld, so verbessert das wissenschaftliche Scheitern dieses Ansatzes in der Umweltökonomie indirekt die Position der Rohstoffverschwender. Wer kann das wollen?

Und Georgescu-Roegen und seine Kollegen? Ob denen die Sache mit der Entropie einmal verziehen wird, wenn dereinst die große Stunde des "ultimate assessment" schlägt, wie man das in Chicago wahrscheinlich nennt? Nun, schon im Diesseits ist die Kirche wohl gegen die Sünde - nicht aber gegen die Sünder! Und hier im Jenseits wird seit jeher gerade denen vergeben, die *nicht* wußten, was sie taten.²⁷

FINIS

Anmerkungen

- ¹ Der Titel erinnert an die *biographie romancée* „Ich, Claudius, Kaiser und Gott“ des römischen Cäsars Claudius, des „Hinkenden“, von Robert v. Ranke-Graves. Kennern der Syntax wird gleichwohl die strukturelle Verschiebung im Titel nicht entgehen.
- ² Mit diesen Worten gibt im 9. Gesang der Odyssee (Vers 20) Odysseus sich den Phäaken zu erkennen. Professor Clausius wählt diese Formulierung des großen Flunkerers in möglicherweise ironischer Absicht. Es ist allerdings nicht ganz auszuschließen, daß Professor Clausius - der als Person durchaus bescheiden war - von seiner großen Entdeckung etwas inflationiert ist (im Sinne der analytischen Psychologie)
- ³ Rudolf Clausius (1822-1888) war Professor für Physik am Eidgenössischen Polytechnikum von 1855-1867, bevor er nach einjährigem Zwischenspiel in Würzburg 1869 einen Ruf an die Universität Bonn annahm, wo er bis zu seinem Lebensende verblieb. (Grete Ronge: „Die Zürcher Jahre des Physikers Rudolf Clausius“, *Gesnerus* 12, 73-108 (1955)) In seiner Arbeit „Über die bewegende Kraft der Wärme, und die Gesetze, die sich daraus für die Wärmelehre ableiten lassen“ (*Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie* 79, 500-524) formuliert er 1850 den 1. und den 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Später wird der 2. Hauptsatz dann mit der 1865 von ihm eingeführten Entropie in Verbindung gebracht.
- ⁴ Persönliche Mitteilung von Dr. Eberhard E. Müller, Studienleiter Promotionsförderung beim Evangelischen Studienwerk „Haus Villigst“ E.V., vom 18. Juni 1980
- ⁵ Am sogenannten Schwarzschild-Horizont eines schwarzen Loches wird die Zeitdilatierung für einen entfernten Beobachter unendlich. ([Check + Literaturzitat suchen](#))
- ⁶ Simon de Laplace: [Zitat suchen](#)
- ⁷ Konstitution „Pastor aeternus“ des 1. Vatikanischen Konzils betreffend die Unfehlbarkeit des Papstes bei Lehrentscheidungen *ex cathedra* in Sachen des Glaubens und der Sitte vom 18. Juli 1870. Wie sehr es sich dabei um einen Befreiungsschlag gegen einen der Kirche gegenüber als feindlich empfundenen Zeitgeist handelte, belegt der dritte Paragraf: „Et quoniam portae inferi ad evertendam, si fieri posset, Ecclesiam, contra eius fundamentum divinitus positum maiore in dies odio undique insurgent, Nos ad catholici gregis custodiam, incolumitatem, augmentum necessarium esse iudicamus, sacro approbante Concilio, doctrinam de institutione, perpetuitate ac naturae sacri Apostolici primatus etc.“ (Und weil sich die Pforten der Unterwelt, um - wenn möglich - die Kirche zu zerstören, mit täglich größerem Haß von überall her gegen ihr von Gott gelegtes Fundament erheben, erachten wir es mit Zustimmung des heiligen Konzils zum Schutz, zur Erhaltung und zum Gedeihen der katholischen Herde für notwendig, die Lehre von der Einsetzung, Fortdauer und Natur des des heiligen Apostolischen Primates...) Zitiert nach: H. Denzinger und P. Hünermann: „Enchiridion symbolorum et declarationum de rebus fidei et morum“, 37. Aufl, Freiburg 1991, § 3052, S 825
- ⁸ „Vorläufig will ich mich darauf beschränken, als ein Resultat anzuführen, daß wenn man sich dieselbe Größe, welche ich in bezug auf einen einzelnen Körper seine Entropie genannt habe, in konsequenter Weise unter Berücksichtigung aller Umstände für das ganze Weltall sich gebildet denkt, und wenn man daneben zugleich den anderen, seiner Bedeutung nach einfacheren Begriff der Energie anwendet, man die den beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie entsprechenden Grundgesetze des Weltalls in folgender einfachen Form aussprechen kann:
 1. Die Energie der Welt ist konstant.
 2. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.“(Zitiert nach G. Ronge, ebd.; Original in: *Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie* 125, 335-400 (1965))

-
- ⁹ Der Problembereich „Wissenschaft versus Glauben“ wird angesprochen, aber nicht wirklich durchdiskutiert in Pascual Jordan: „Der Naturwissenschaftler vor der religiösen Frage“, Oldenburg, 1963
- ¹⁰ Entsprechend der Manie der Physik des 19. Jahrhunderts, für alles und jedes mechanische Modelle zu entwerfen, hat Clausius versucht, eine molekulartheoretische Deutung der Wärme zu geben. So ist er auch zu einem Pionier der kinetischen Gastheorie geworden. Von modernen Kritikern insbesondere aus dem Bereich der Kontinuumsmechanik liegt gerade darin der entscheidende Sündenfall in der Entwicklung der Thermodynamik. Der pointierteste, womöglich scharfsinnigste, mit Sicherheit aber gebildetste Kritiker dieser Entwicklung ist Clifford A. Truesdell. Einerseits hat Truesdell es unternommen, die Carnot-Reechsche Thermodynamik ohne Rückgriff auf mechanische Konzepte zu rekonstruieren (C.A. Truesdell and S. Bharata "Classical Thermodynamics as a Theory of Heat Engines", Springer, New York, 1977), andererseits hat er Clausius' restaurative Bekehrung zu einem Molekülmechaniker mit spitzer Feder verspottet (C.A. Truesdell: "The Tragicomical History of Thermodynamics 1822-1854", Springer, New York, 1980): "Clausius kept his faith private until the time had become ripe for an evangelist... Had Clausius been able to organize and clarify his work in some such way as our analysis in the preceding section has shown possible, he could have pulled thermodynamics out of the slough of obscurity in which Carnot left it; he could have made of it a beacon of enlightenment. He did not so." (ebd. S 205) Auch macht er Clausius verantwortlich für die lausige Mathematik, die in der Thermodynamik bis heute an der Tagesordnung ist: "The tragicomic muse must laugh when modern specialists in thermodynamics state that Clausius had 'very strict standards of mathematical rigor'. Few mathematical physicists have shown so little sense of the right mathematics for the job." (ebd. S 206)
- ¹¹ Ein vielleicht extremes, in seiner Art jedenfalls eindrückliches Beispiele bildet ein reformierter Pfarrer, Rhenus Brennus Gelpke, der nach seiner Pensionierung im Herbst 1974 an der ETH Zürich ein Chemiestudium begann. Pfarrer Gelpke erklärte gleich zu Anfang, er plane ein Buch über Entropie zu schreiben. Sein damaliger Praktikumsassistent, Dr. Robert Gehrig (heute an der Eigenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA Dübendorf) berichtet: „Im Praktikum machten wir einen Versuch über den Chelateffekt. Das ist das Phänomen, daß sich aufgrund eines Entropieeffektes eine besonders starke Bindung von Liganden an ein zentrales Metallatom ausbildet. In meiner Versuchseinführung sagte ich zu den erstsemestrigen Studenten, daß das mit der Entropie halt etwas schwierig sei und daß sie das aber später noch genauer durchnehmen würden. Da sprang Pfarrer Gelpke auf und rief in aller Bestimmtheit, hier könne nun er weiterhelfen. Und dann redete er etwa zehn Minuten lang, mit großer Beredtheit und wahrer Leidenschaft - ohne daß es die Anwesenden im Chelateffekt oder in der Entropiesache auch nur um das geringste weiter gebracht hätte, mich selbst dabei mit inbegriffen.“
- ¹² Der Keplerbund wurde im Jahr 1907 in Frankfurt gegründet, um als Gegenspieler des ein Jahr zuvor gegründeten, kirchenfeindlichen Haeckel-Ostwaldschen Monistenbundes „christliche Weltanschauung mit naturwissenschaftlicher Orientierung aufzubauen, zu pflegen (und) unserem Volk in seinen weitesten und breitesten Schichten darzubieten“ (M. H. Baeger: „Der Keplerbund und seine Gelehrten. Eine notwendige Auseinandersetzung“, Frankfurt, 1911, S 5)
- ¹³ Hans Christoph Binswanger: „Die Glaubensgemeinschaft der Ökonomen“ in: Hans Christoph Binswanger: „Die Glaubensgemeinschaft der Ökonomen“, München 1998, S 47 - 64
- ¹⁴ Johann von Neumann (1903-1957), ungarischer Mathematiker. Eine der Jahrhundertgestalten der Mathematik.
- ¹⁵ Claude Shannon (geb. 1916), amerikanischer Ingenieur. Gemeinsam mit W. Weaver Begründer der Informationstheorie, in die er eine probabilistische Entropie als Informationsmaß eingeführt hat
- ¹⁶ Zitiert nach K. G. Denbigh and J. S. Denbigh: „Entropy in Relation to Incomplete Knowledge“, Cambridge, 1985, S 104

¹⁷ Nicholas Georgescu-Roegen: „The Entropy Law and the Economic Process” Cambridge, Mass, 1971; Herman E. Daly „On Nicholas Georgescu-Roegen's Contributions to Economics: an Obituary Essay”, *Ecological Economics* 13, 149-154 (1995); lesenswert: Robert U. Ayres: „Eco-Thermodynamics and the Second Law”, *Ecological Economics* 26, 189-209 (1998)

¹⁸ Binswanger selbst ist, wenn ich das richtig sehe, in seinen Schriften stets bei der Metapher stehen geblieben (Vgl. etwa „Die Umweltzerstörung als beschleunigte Entwertung von Energie und Materie” in Hans Christoph Binswanger et al.: „Arbeit ohne Umweltzerstörung”, Frankfurt, 1983, S 82-90; „Das Entropiegesetz als Grundlage einer ökologisch orientierten Wirtschaftstheorie” in Hans Christoph Binswanger: „Geld und Natur. Das wirtschaftliche Wachstum im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie”, Stuttgart 1991, S 65-82)

¹⁹ Georgescu-Roegens „vierter Hauptsatz ” besagt, daß der Vorgang der Vermischung immer weiter geht, auch wenn genügend Energie vorhanden ist (mit der man Mischungen ja immer wieder trennen kann, wie jeder Chemiker weiß - nach dem Muster der Destillation. Diese Möglichkeit scheint Georgescu-Roegen nicht in Betracht zu ziehen) Eine genauere Formulierung seines „vierten Hauptsatzes” ist (R. U. Ayres, ebd. S 197): „(i) Unavailable matter cannot be recycled; and (ii) a closed system (i.e. a system that cannot exchange matter with the environment) cannot perform work indefinitely at a constant rate.” Gegenbeispiele zu (i): Durch Thermodiffusion kann man mit Hilfe von Sonnenenergie Mischungen entmischen, z.B. Meerwasser entsalzen. Zu (ii): Eine Solarzelle in einem Weltraumsatelliten tauscht mit der Umgebung Strahlungsenergie, aber keine Materie aus.. (Da die Alterung der Zelle nicht Gegenstand der Thermodynamik ist, ist der Widerspruch offensichtlich).

²⁰ Die Gibbssche freie Enthalpie G ist gegeben durch $G = H - TS$. Darin ist H die Energie (eigentlich: die Enthalpie), T die absolute Temperatur (in Kelvin) und S die Entropie. Bei spontanen (isotherm-isobaren) Prozessen nimmt G ab, das thermodynamische Gleichgewicht ist erreicht, wenn G minimal ist. Nur wenn H fest vorgeben ist, nimmt G genau dann ab, wenn S zunimmt. In der Regel ist das aber nicht der Fall, da isotherm operierende Systeme mit der Umgebung Energie austauschen. In einem solchen Fall kann G sein Minimum durchaus auch bei abnehmender Entropie erreichen. Wenn etwa ein See zufriert, gibt er die Schmelzenergie an die umgebende Atmosphäre ab. Zugleich nimmt seine Entropie ab.

²¹ Gabriel A. Lozada: „Goergescu-Roegen's Defense of Classical Thermodynamics”, *Ecological Economics* 14, 31-44 (1995)

²² Die Mischungsentropie S^{misch} eines stofflichen Systems mit k verschiedenen Stoffen ist gegeben durch

$$S^{\text{misch}} = - R \sum n_i \ln x_i$$

Darin ist n_i die im System vorhandene Anzahl Mole der i-ten Substanz, $x_i = n_i / \sum n_j$ ihr Molenbruch. Die Indizes i und j laufen jeweils von 1 bis k. $R = 8,31441 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ (Joule pro Grad Kelvin pro Mol) ist die Gaskonstante.

²³ Binswanger hat richtigerweise darauf hingewiesen, das dieses Argument nicht zutrifft für die atmosphärischen Freisetzung von Blei in Form von Bleitetraäthyl aus Motorkraftfahrzeugen. Es trifft gleichfalls nicht zu für die Verwendung von Phosphaten in der Landwirtschaft, die aus ganz wenigen Lagerstätten vor allem in Marokko stammen. In diesen Fällen werden die Abfallstoffe tatsächlich in sehr verdünnter Form freigesetzt. Beispiele und Gegenbeispiele zeigen, daß beides vorkommt, die Verdünnung ebenso wie die Konzentrierung. Damit ist aber klar, dass die Entropiezunahme als *vereinheitlichendes Konzept der Abfallproduktion* nicht in Frage kommt. (Noch ergänzen. Gegebenenfalls Literaturstelle Lichtensteiger einarbeiten)

²⁴ Schrödingers „What is Life?” ist von professioneller Seite vernichtend kritisiert worden, so von Linus Pauling („Schrödingers Contribution to Chemistry and Biology” in C.W. Kilmister (Ed.): „Schrödinger. Centenary Celebration of a Polymath”, Cambridge, 1987; S 225-233) und von Max Perutz („Erwin Schrödinger's What is Life? and Molecular Biology”, in Kilmister (loc.cit), S 234-251). Seine Aussage („Was ist Leben?” Deutsche Fassung, Francke, Bern 1946, S 113): „Jeder Vorgang, jedes Ereignis, Geschehen - nenne man es, wie man will - mit

einem Wort alles, was in der Natur vor sich geht, bedeutet eine Vergrößerung der Entropie in jenem Teil der Welt, in welchem es vor sich geht." ist in einem Maße salopp, wie es selbst in einem populären Text nicht hingenommen werden kann. Dasselbe gilt für die unmittelbar folgende Aussage zur Biologie: „Das wesentliche Ding im Stoffwechsel ist, daß es dem Organismus gelingt, sich von all der Entropie zu befreien, welche zu erzeugen er, solange er lebt, nicht vermeiden kann". Falsch ist sodann die Behauptung. „Von was ein Organismus sich ernährt, ist negative Entropie" Sobald man „negative Entropie" ersetzt durch „Stoffe hoher freier Enthalpie", wird der Satz korrekt. Das Gerede von einer „negativen Entropie", gelegentlich auch als „Negentropie" verballhornt, hat sich wie eine häßliche Seuche vor allem in der Biologie verbreitet. Und von der Biologie zur Ökonomie ist es seit Darwin nur noch ein kurzes Stück.

²⁵ Erwin Schrödinger „Statistical Thermodynamics. A Course of Lectures. Delivered January-March 1944, at the School of Theoretical Physics, Dublin Institute for Advanced Studies." London, 1945.

²⁶ In dem mir vorliegenden Neudruck (Cambridge University Press, 1967) findet sich auf Seite 79 folgende *note to chapter 6*: „The remarks on negative entropy have met me with doubt and opposition from my physicist colleagues. Let me say first, that if I had been catering for them alone I should have let the discussion turn on free energy instead." Den Rest dieser "note" lasse ich hier aus, um Schrödingers Bild nicht noch weiter zu verdunkeln. Es muß aber gesagt werden, daß selbst diese Korrektur wiederum höchst nachlässig ausgeführt worden ist. In der angelsächsischen Literatur wird "freie Enthalpie" häufig als "Gibbs free energy" bezeichnet (Offensichtlich ist Enthalpie (enthalpy) als Terminus bereits zu fremd), während das, was wir in der Originalterminologie als "freie Energie" bezeichnen, dort zur Unterscheidung als "Helmholtz free energy" bezeichnet wird. Wenn Schrödinger einfach nur von "free energy" spricht, ist wiederum nur dem Fachmann klar, was er meint.

²⁷ Es fällt auf, wie sehr sich Professor Clausius - unter dem Einfluß jenseitiger Wohlinformiertheit - von typischen weltanschaulichen Standpunkten eines Wissenschaftlers aus dem 19. Jahrhundert entfernt hat. Es hat das offensichtlich zu einer Annäherung an diesseitig vertretene Positionen der römischen Kirche geführt, was die Gebildeten unter ihren Verächtern nachdenklich stimmen könnte.